

Traction Control pada Parallel Hybrid Electric Vehicle (HEV) dengan Menggunakan Metode Kontrol Neuro-Fuzzy Prediktif

Bayu Prasetyo Wibowo, Rusdhianto Effendi A.K., dan Eka Iskandar

Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111

E-mail: rusdhi@elect-eng.its.ac.id

Abstrak—Penggunaan bahan bakar minyak untuk kendaraan bermotor yang semakin meningkat menyebabkan semakin menurunnya stok bahan bakar minyak di dunia. Hal ini menyebabkan terjadinya krisis energi di dunia. Selain itu, semakin banyaknya penggunaan bahan bakar minyak pada kendaraan bermotor menyebabkan semakin meningkatnya polusi udara. Polusi yang dihasilkan oleh kendaraan bermotor akan menyebabkan *global warming* sehingga suhu di atmosfer bumi akan meningkat. Dalam upaya menanggulangi krisis energi dan bahaya *global warming* yang dihasilkan oleh kendaraan bermotor, maka diciptakan suatu kendaraan alternatif yang hemat energi dan ramah lingkungan yang disebut *Hybrid Electric Vehicle (HEV)*. HEV merupakan suatu kendaraan yang menggunakan *Internal Combustion Engine (ICE)* dan motor listrik sebagai motor penggerakannya. Salah satu permasalahan yang masih terjadi pada HEV yaitu akselerasi. Kontroler *Neuro-Fuzzy Prediktif* digunakan untuk mengatur kecepatan motor DC ketika proses akselerasi HEV. Berdasarkan hasil pengujian didapatkan respon kecepatan HEV dapat mencapai model referensi yang diberikan pada $t = 0,051$ s sehingga dapat disimpulkan kontroler *Neuro-Fuzzy Prediktif* dapat mempercepat akselerasi pada HEV.

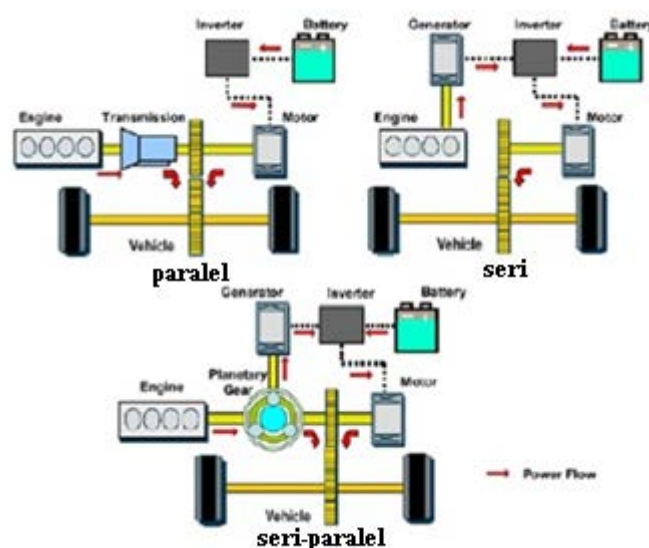
Kata Kunci—akselerasi, HEV, motor DC, Neuro-Fuzzy Prediktif

I. PENDAHULUAN

PENGUNAAN bahan bakar minyak untuk kendaraan bermotor yang semakin meningkat menyebabkan semakin menurunnya stok bahan bakar minyak di dunia. Hal itu menyebabkan terjadinya krisis energi di dunia. Selain itu, semakin banyaknya penggunaan bahan bakar minyak pada kendaraan bermotor menyebabkan semakin meningkatnya polusi udara. Polusi yang dihasilkan oleh kendaraan bermotor akan menyebabkan *global warming* sehingga suhu di atmosfer bumi akan meningkat.

Dalam upaya menanggulangi krisis energi dan bahaya *global warming* yang dihasilkan oleh kendaraan bermotor, maka diciptakan suatu kendaraan alternatif yang hemat energi dan ramah lingkungan yang disebut *Hybrid Electric Vehicle (HEV)*. HEV merupakan suatu kendaraan yang menggunakan *internal combustion engine (ICE)* dan motor listrik sebagai motor penggerakannya. Dengan adanya HEV ini menyebabkan ICE tidak bekerja sendiri dalam menggerakkan kendaraan sehingga penggunaan bahan bakar dapat diminimalkan.

Pada proses akselerasi, ICE membutuhkan bantuan dari motor listrik untuk mempercepat tercapainya akselerasi sesuai



Gambar 1. Konfigurasi HEV [1]

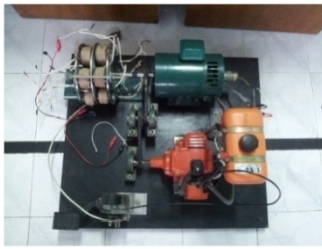
dengan *set point* yang diinginkan. Peningkatan performa HEV ini tentunya membutuhkan suatu algoritma kontrol tertentu. Proses peningkatan performa HEV dilakukan dengan cara mengatur kecepatan motor listrik sehingga akan mencapai suatu nilai referensi tertentu. Pada penelitian ini akan digunakan metode kontrol *Neuro-Fuzzy Prediktif* untuk meningkatkan performa HEV ketika terjadi proses percepatan.

II. DESKRIPSI SISTEM

A. Hybrid Electric Vehicle (HEV) [1] [2]

Hybrid Electric Vehicle (HEV) merupakan kendaraan yang mengombinasikan antara mesin bahan bakar dan mesin listrik. Saat ini HEV sedang dikembangkan di beberapa negara karena dengan adanya HEV ini polusi yang dihasilkan semakin kecil, selain itu pemakaian minyak bumi sebagai bahan bakar kendaraan bermotor akan semakin berkurang. Berdasarkan arsitektur mekanik, HEV dibagi menjadi tiga kategori yaitu: konfigurasi seri, konfigurasi paralel, dan konfigurasi seri-paralel.

Pada konfigurasi seri, motor listrik berfungsi penuh sebagai penggerak HEV. Energi yang dihasilkan oleh mesin bahan bakar dikonversikan menjadi energi listrik. Pada konfigurasi paralel, dua sumber energi bisa menggerakkan HEV secara bergantian maupun secara bersamaan. Sedangkan pada



Gambar 2. Simulator HEV

konfigurasi seri-paralel, yaitu mengombinasikan keduanya dimana mesin bahan bakar dapat berfungsi sebagai penggerak HEV dan dapat juga berfungsi sebagai sumber energi bagi motor listrik.

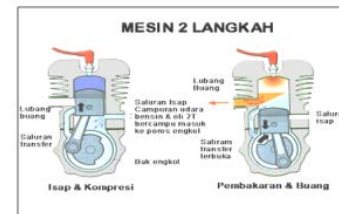
Pada HEV dengan konfigurasi paralel, sumber energi yang ada pada HEV ini bekerja sesuai dengan porsinya masing-masing. Pada saat HEV akan bergerak, maka mesin listrik yang menggerakkan HEV sedangkan mesin bahan bakar tidak bekerja pada kondisi ini. Hal ini dikarenakan pada kondisi tersebut kecepatan HEV tidak terlalu tinggi sehingga energi yang dibutuhkan tidak terlalu besar. Pada saat kondisi akselerasi, ICE dan mesin listrik bekerja secara bersamaan karena energi yang dibutuhkan besar. Pada saat HEV dalam kondisi kecepatan tinggi konstan, ICE yang bertugas untuk menggerakkan roda. Hal ini dikarenakan pada saat ini energi yang dibutuhkan sangat besar, apabila motor listrik juga bekerja pada kondisi tersebut maka dikhawatirkan akan mengganggu kecepatan dari HEV.

Pada penelitian Tugas Akhir ini akan digunakan simulator HEV dengan konfigurasi paralel.

B. Internal Combustion Engine (ICE) 2 Tak [3]

Mesin bakar merupakan suatu perangkat yang dapat mengubah energi kalor menjadi energi gerak. Mesin bakar dibagi menjadi dua macam, yaitu: *internal combustion engine (ICE)* dan *external combustion engine (ECE)*. Konstruksi ICE lebih sederhana dibandingkan dengan ECE, selain itu tingkat efisiensi ICE juga lebih tinggi daripada ECE. ICE biasanya digunakan pada kendaraan bermotor, seperti: mesin dua langkah (dua tak), mesin empat langkah (empat tak), dan mesin diesel. Pada subbab ini akan dibahas mengenai ICE dua langkah (dua tak).

ICE dua tak merupakan mesin bensin dimana pada suatu kerja diperlukan dua kali gerakan piston dan satu kali putaran poros. Langkah awal pada ICE dua tak disebut sebagai langkah hisap dan kompresi. Pada langkah ini, piston bergerak menuju TMA sehingga menyebabkan ruang engkol membesar dan menjadikan ruang tersebut hampa (*vacuum*). Katup hisap terbuka sehingga campuran udara dan bahan bakar masuk menuju ruang engkol. Ketika piston bergerak menuju TMA menyebabkan katup hisap tertutup sehingga akan menyebabkan tekanan dan suhu bahan bakar di atas piston naik. Beberapa saat sebelum piston sampai di TMA, akan terjadi percikan api dari busi dan terjadi proses pengapian. Hal ini menimbulkan gaya yang mendorong piston bergerak menuju TMB. Pada langkah kedua disebut sebagai langkah kerja dan buang. Sesaat setelah piston bergerak menuju TMB, katup buang akan terbuka dan menyebabkan sisa gas pembakaran keluar dari ruang silinder. Ketika piston bergerak menuju TMB akan menyebabkan campuran bahan bakar dan



Gambar 3. Siklus Kerja ICE 2 Tak

udara bergerak ke atas. Siklus kerja ICE dua tak dapat dilihat pada Gambar 3.

C. Motor DC [4]

Motor listrik merupakan suatu perangkat yang dapat mengubah energi listrik menjadi energi mekanik. Berdasarkan sumber yang dibutuhkan, motor listrik dibagi menjadi dua yaitu: motor listrik AC dan motor listrik DC. Motor DC merupakan motor listrik yang membutuhkan sumber berupa tegangan searah untuk diubah menjadi energi mekanik.

Pada saat motor diberi *supply* tegangan, maka akan terdapat torsi yang dibangkitkan. Torsi yang dibangkitkan pada motor DC dapat dicari melalui persamaan

$$\tau = K\Phi I_a \quad (1)$$

dimana:

τ : torsi yang dibangkitkan

K : konstanta motor

Φ : fluks magnet

I_a : arus jangkar

Berdasarkan rangkaian ekivalen motor DC *shunt*, didapatkan rumus

$$V_T = E_a + I_a R_a \quad (2)$$

$$I_a = \frac{V_T - E_a}{R_a} \quad (3)$$

Gaya gerak listrik (ggl) induksi akan muncul ketika motor berputar, sehingga didapatkan persamaan

$$E_a = K\Phi\omega \quad (4)$$

Maka hubungan antara torsi dan kecepatan sudut motor DC dapat dicari melalui persamaan

$$V_T = E_a + I_a R_a \quad (5)$$

$$V_T = K\Phi\omega + \frac{\tau}{K\Phi} R_a \quad (6)$$

$$\omega = \frac{V_T}{K\Phi} - \frac{\tau}{(K\Phi)^2} R_a \quad (7)$$

dimana:

V_T : tegangan *supply*

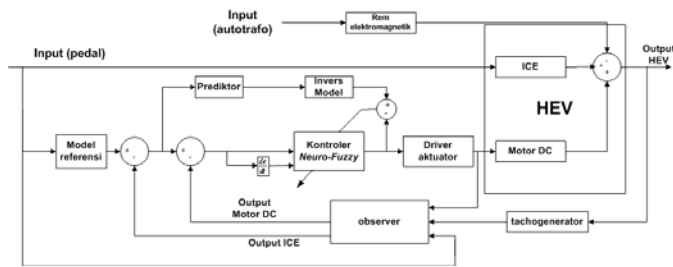
R_a : tahanan jangkar

ω : kecepatan sudut motor

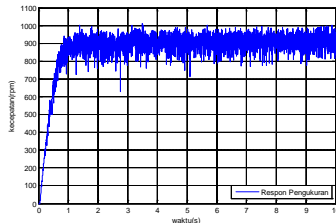
τ : torsi motor

III. PERANCANGAN SISTEM [1][2]

HEV merupakan suatu kendaraan dengan penggerak berupa gabungan ICE dan motor DC. Simulator HEV yang digunakan pada Tugas Akhir ini mengambil prinsip yang sama dengan HEV. Simulator HEV yang digunakan menggunakan konfigurasi paralel, dimana ICE bertindak sebagai penggerak



Gambar 4. Diagram Blok Sistem



Gambar 5. Respon Kecepatan ICE dengan Beban Nominal

utama sedangkan motor DC bertindak sebagai penggerak pembantu ketika proses akselerasi dan pemberian beban. Pada Tugas Akhir kali ini akan dibahas mengenai pengaturan kecepatan motor DC ketika proses akselerasi. Diagram blok sistem ditunjukkan oleh Gambar 4. Model referensi yang digunakan merupakan karakteristik respon *plant* yang diinginkan. Model referensi harus memiliki *rise time* yang lebih cepat daripada *rise time* ICE dan tidak memiliki *error steady state*. Dengan adanya model referensi ini, diharapkan motor DC dapat membantu ICE agar dapat mencapai model referensi yang diinginkan.

A. Identifikasi dan Permodelan Sistem [5]

Proses identifikasi bertujuan untuk mencari parameter-parameter dari *plant*. Parameter-parameter yang sudah didapatkan digunakan untuk membuat model matematis dari sistem. Pada Tugas Akhir ini, identifikasi ICE dilakukan menggunakan metode *Strejc* sedangkan identifikasi motor DC menggunakan metode analitis. Permodelan ICE dilakukan pada tiga kondisi, yaitu kondisi beban minimal, beban nominal, dan beban maksimal.

Pengujian dan validasi respon *open loop* ICE dilakukan dengan identifikasi menggunakan metode *Strejc* pada perhitungan dibawah ini:

$$Y_{ss} = 914 \quad (8)$$

$$X_{ss} = 914 \quad (9)$$

$$K = \frac{Y_{ss}}{X_{ss}} = \frac{914}{914} = 1 \quad (10)$$

Dari grafik respon pada Gambar 5, dan dengan mencari parameter respon seperti pada Gambar 6, maka didapat :

$$T_u = 0,06133 \quad (11)$$

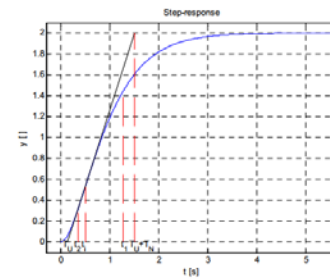
$$T_N = 0,5843 \quad (12)$$

Maka nilai parameter τ didapatkan dari persamaan

$$\tau = \frac{T_u}{T_N} = \frac{0,06133}{0,5843} = 0,1049 \quad (13)$$

Pada kondisi $\tau > 0$, sistem akan didekati dengan model orde ke-n seperti pada persamaan

$$G(s) = \frac{K}{(\tau_{ST}s+1)^n} \quad (14)$$

Gambar 6. Respon Step Sistem dengan waktu T_u , T_N , t_1 , dan t_2

Tabel 1.

n	τ	y_i	N	τ	y_i
2	0,014	0,264	7	0,57	0,394
3	0,218	0,327	8	0,642	0,401
4	0,319	0,359	9	0,709	0,407
5	0,41	0,371	10	0,773	0,413
6	0,493	0,384			

- a. Dari penghitungan τ , ditentukan orde sistem berdasarkan Tabel 1

Berdasarkan Tabel 1, didapatkan bahwa pendekatan model yang paling mendekati adalah model orde-2.

- b. Nilai *time constant* τ_{ST} didapatkan dari persamaan

$$\tau_{ST} = \frac{t_1}{n-1} \quad (15)$$

Nilai t_1 merupakan waktu ketika respon mencapai 0,264 dari Y_{ss} .

$$y_i = 0,264(914) \quad (16)$$

$$y_i = 241,296 \quad (17)$$

Waktu saat respon mencapai y_i adalah

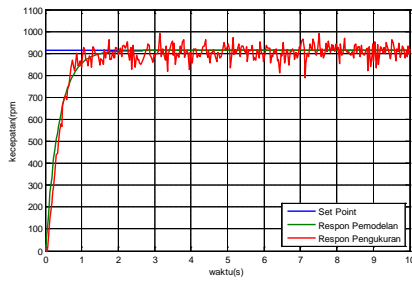
$$t_i = 0,1848 \quad (19)$$

Maka didapatkan nilai τ_{ST} , sebesar

$$\tau_{ST} = \frac{0,1848}{2-1} \quad (20)$$

Berdasarkan Persamaan (20), maka dapat disimpulkan bahwa model matematis ICE dengan beban nominal adalah

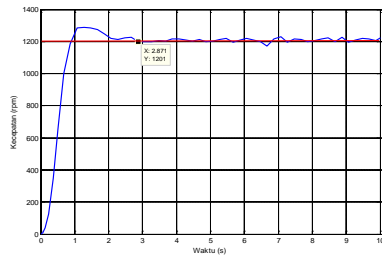
$$G(s) = \frac{1}{(0,1848 + 1)^2}$$



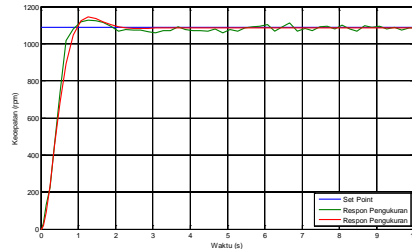
Gambar 7. Hasil Identifikasi dan Permodelan ICE dengan Beban Nominal

Tabel 3.
Permodelan ICE dengan Beban Nominal

No	Fungsi AlihPlant	RRMSE(%)
1	$G(s) = \frac{1.29}{(0.3118s + 1)^2}$	4.39
2	$G(s) = \frac{1.31}{(0.3133s + 1)^2}$	4.49
3	$G(s) = \frac{1.302}{(0.3128s + 1)^2}$	4.37
4	$G(s) = \frac{1.27}{(0.3107s + 1)^2}$	4.61
5	$G(s) = \frac{1.25}{(0.3088s + 1)^2}$	5.463



Gambar 8. Respon Kecepatan Motor DC



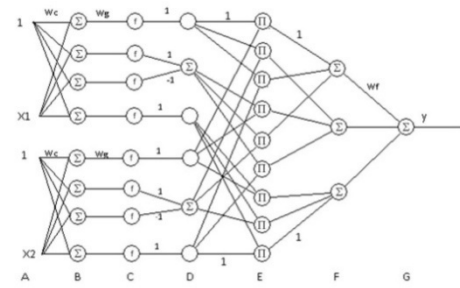
Gambar 9. Hasil Identifikasi dan Permodelan Motor DC

Permodelan motor DC dilakukan menggunakan metode analitis dengan mencari parameter ω_n , ξ , dan ω_d . Identifikasi motor DC dilakukan dengan memberikan tegangan *input* sebesar 75 VDC. *Output* motor DC dikonversikan menjadi rpm dengan cara mengukur putaran pada poros motor DC menggunakan *tachometer*.

Berdasarkan respon pada Gambar 8, diketahui bahwa respon kecepatan motor DC dapat didekati dengan model matematis orde ke-2 *underdamped* ($0 < \xi < 1$).

Berdasarkan perhitungan analitis didapatkan persamaan fungsi alih kecepatan motor DC sebagai berikut:

$$G(s) = \frac{11,01}{(s^2 + 4,5s + 11,056)}$$



Gambar 10. Struktur Jaringan FMN Tipe II

B. Model Referensi

Model referensi merupakan model matematis dengan karakteristik respon *plant* yang diinginkan. Model referensi harus memiliki *rise time* yang lebih cepat daripada *rise time* ICE dan tidak memiliki *error steady state*. Dari hasil identifikasi didapatkan *rise time* motor bakar sebesar 1 s dan nilai *time constant* sebesar 0,3726 s. Model referensi harus memiliki *rise time* lebih cepat dan *time constant* yang lebih kecil sehingga dipilih model referensi dengan fungsi alih ditunjukkan pada persamaan

$$G(s) = \frac{1}{0,2s + 1}$$

C. Perancangan Kontroler Neuro-Fuzzy Prediktif [6]

Pada Tugas Akhir ini akan digunakan kontroler *Neuro-Fuzzy* Prediktif. Kontroler ini akan digunakan untuk mengatur traksi pada simulator HEV. Kontroler *Neuro Fuzzy* Prediktif menggunakan target keluaran prediktif yang diperoleh dari permodelan *invers model* pada plant. Salah satu struktur *Neuro Fuzzy* yang dapat digunakan dalam mengontrol suatu plant adalah *Fuzzy Modelling Networks (FMN)*.

a. Lapisan A

$$O_{1,1} = 1 ; O_{2,1} = X_1 ; O_{3,1} = 1 ; O_{3,1} = X_2 \quad (21)$$

b. Lapisan B

$$O_{i,2} = 1(w_c) + X_1 \quad (22)$$

$$O_{j,2} = 1(w_c) + X_2 \quad (23)$$

dimana $i = 1,2,3,4$ dan $j = 5,6,7,8$

c. Lapisan C

$$O_{i,3} = \frac{1}{1 + e^{-wg(o_{i,2})}} \quad (24)$$

$$O_{j,3} = \frac{1}{1 + e^{-wg(o_{j,2})}} \quad (25)$$

dimana $i = 1,2,3,4$ dan $j = 5,6,7,8$

d. Lapisan D

$$O_{1,4} = O_{1,3} \quad (26)$$

$$O_{2,4} = O_{2,3} + (-1)O_{3,3} \quad (27)$$

$$O_{3,4} = O_{4,3} \quad (28)$$

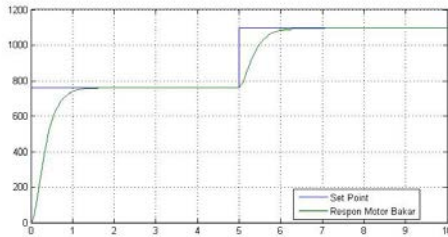
e. Lapisan E

$$O_{i,5} = O_{m,4} \times O_{n,4} \quad (29)$$

dimana $i = 1,2,3,...,9$; $m = 1,2,3$; $n = 1,2,3$

Tabel 4.

Basis Aturan <i>Neuro-Fuzzy Controller</i>				
Gaya (u)		error (e)		
		N	Z	P
delta error (Δe)	N	N	P	Z
	Z	N	Z	P
	P	Z	N	P



Gambar 11. Respon ICE Berbeban Tanpa Bantuan Motor DC Terhadap Sinyal Step

Untuk memperjelas konfigurasi pada lapisan E, Gambar 10 menampilkan konfigurasi setiap *node* pada lapisan E. Kombinasi aturan tersebut disajikan dalam bentuk linguistik sebagai berikut:

IF x_1 *is* $O_{m,4}$ **AND** x_2 *is* $O_{n,4}$ **THEN** y *is* constant

f. Lapisan F

$$O_{i,6} = \sum_{m=1}^9 O_{m,5} \quad (30)$$

dimana $i = 1, 2, 3$

g. Lapisan G

$$O_{i,7} = \sum_{i=1}^3 O_{i,6} \times w_f \quad (31)$$

Selanjutnya untuk perubahan bobot dilakukan tahap *backpropagation*. Data target untuk kontroler *Neuro-Fuzzy* didapatkan dari *Model Reference Based Invers Model*.

IV. PENGUJIAN DAN ANALISIS SISTEM

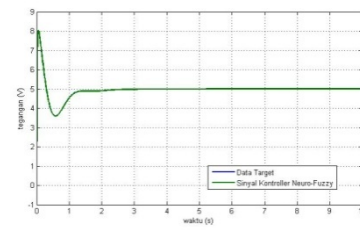
Pengujian dan analisis sistem dilakukan melalui simulasi pada *software* Matlab. Pengujian dilakukan dengan memberikan beban nominal pada *plant*.

A. Pengujian ICE Berbeban Nominal Tanpa Bantuan Motor DC

Pada tahap simulasi, dilakukan pengujian terhadap *set point* dengan perubahan amplitudo. Amplitudo pertama memiliki nilai sebesar 760,6 rpm, sedangkan amplitudo kedua memiliki nilai sebesar 1095 rpm. Pada Gambar 4.2 dapat dilihat bahwa respon ICE dapat mencapai kedua amplitudo yang diberikan. Pada saat amplitudo *set point* sebesar 760,6 rpm diperoleh *rise time* $t_r = 0,8147$ s, sedangkan pada amplitudo *set point* sebesar 1095 rpm diperoleh *rise time* $t_r = 0,8495$ s.

B. Pengujian Kontroler Neuro-Fuzzy Terhadap Sinyal Target

Kontroler *Neuro-Fuzzy* memiliki kemampuan untuk melakukan *learning*, sehingga akan diperoleh data *output* yang sesuai dengan data target. Kemampuan *learning* dari kontroler *Neuro-Fuzzy* dipengaruhi oleh *learning rate* (α) yang dimiliki. Pada Tugas Akhir ini dibutuhkan waktu *learning* kontroler

Gambar 12. Output Kontroler Neuro-Fuzzy Dengan $\alpha=0,01$

Neuro-Fuzzy yang cepat karena *plant* HEV memiliki respon yang cepat. Pada subbab ini akan dilakukan pengujian terhadap beberapa nilai *learning rate*.

a. Learning rate ($\alpha=0,0001$)

Pada pengujian ini akan diberikan nilai $\alpha=0,0001$. Data target yang akan menjadi sinyal masukan adalah sinyal random. Berdasarkan Gambar 4.3 dapat dilihat bahwa kontroler *Neuro-Fuzzy* memiliki kemampuan untuk *learning* terhadap data target. Sinyal Kontroler *Neuro-Fuzzy* mampu beradaptasi dengan data target pada $t = \pm 4,2$ s.

b. Learning rate ($\alpha=0,001$)

Pada pengujian ini akan diberikan nilai $\alpha=0,001$. Data target yang akan menjadi sinyal masukan adalah sinyal random. Berdasarkan Gambar 4.4 dapat dilihat bahwa kontroler *Neuro-Fuzzy* memiliki kemampuan untuk *learning* terhadap data target. Sinyal Kontroler *Neuro-Fuzzy* mampu beradaptasi dengan data target pada $t = \pm 1,18$ s.

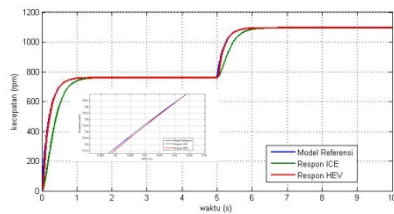
c. Learning rate ($\alpha=0,01$)

Pada pengujian ini akan diberikan nilai $\alpha=0,01$. Data target yang akan menjadi sinyal masukan adalah sinyal random. Berdasarkan Gambar 4.5 dapat dilihat bahwa kontroler *Neuro-Fuzzy* memiliki kemampuan untuk *learning* terhadap data target. Sinyal Kontroler *Neuro-Fuzzy* mampu beradaptasi dengan data target pada $t = \pm 0,025$ s.

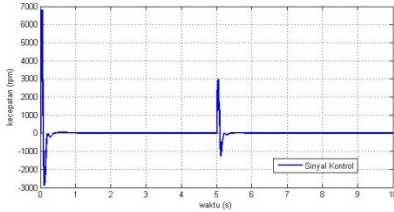
Berdasarkan pengujian antara data target dengan data *output* kontroler *Neuro-Fuzzy* diperoleh nilai *learning rate* ($\alpha=0,01$) memiliki waktu adaptasi paling cepat. Sehingga nilai *learning rate* yang terbaik untuk kontroler *Neuro-Fuzzy* adalah $\alpha=0,01$.

C. Pengujian Menggunakan Kontroler Neuro-Fuzzy Tanpa Model Prediksi

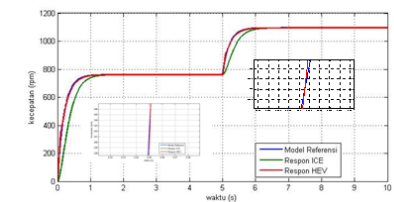
Pengujian kedua dilakukan dengan memberikan *set point* dengan perubahan amplitudo sebesar 760,6 rpm dan 1095 rpm. Pada Gambar 13 dapat dilihat bahwa ketika diberi *set point* sebesar 760,6 rpm respon HEV mampu mengikuti model referensi pada $t = \pm 0,6175$ s pada saat proses akselerasi, sedangkan ketika diberi *set point* sebesar 1095 rpm respon HEV mampu mengikuti model referensi pada $t = \pm 0,6$ s. Sinyal *output* controller *Neuro-Fuzzy* dapat dilihat pada Gambar 14.



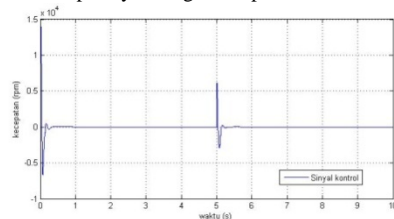
Gambar 13. Respon ICE Berbeban Dengan Bantuan Motor DC Tanpa Model Prediksi Terhadap Sinyal dengan Amplitudo Berubah



Gambar 14. Sinyal Kontrol Motor DC Tanpa Model Prediksi Terhadap Sinyal dengan Amplitudo Berubah



Gambar 15. Respon ICE Berbeban Dengan Bantuan Motor DC Menggunakan Model Prediksi Terhadap Sinyal dengan Amplitudo Berubah



Gambar 16. Sinyal Kontrol Motor DC Menggunakan Model Prediksi Terhadap Sinyal dengan Amplitudo Berubah

D. Pengujian Menggunakan Kontroler Neuro-Fuzzy Dengan Model Prediksi

Pengujian kedua dilakukan dengan memberikan *set point* dengan perubahan amplitudo sebesar 760,6 rpm dan 1095 rpm. Pada Gambar 15 dapat dilihat bahwa ketika diberi *set point* sebesar 760,6 rpm, respon HEV mulai mencapai model referensi pada $t = 0,051$ s. Sedangkan pada saat diberi *set point* sebesar 1095 rpm, respon HEV mencapai model referensi pada $t = 0,051$ s. Sinyal *output* controller *Neuro-Fuzzy* dapat dilihat pada Gambar 16.

V. KESIMPULAN

Kontroler *Neuro-Fuzzy* memiliki kemampuan adaptasi yang cepat. Berdasarkan hasil pengujian, kontroler *Neuro-Fuzzy* mampu mengikuti sinyal *input* dengan rata-rata *error* $\pm 17,42$ rpm.

Kontroler *Neuro-Fuzzy* Prediktif dapat membantu respon HEV mencapai model referensi pada $t = 0,051$ s. Dengan demikian, akselerasi HEV yang diharapkan dapat tercapai. Dalam kondisi tanpa bantuan motor DC, pada respon transien $t = 0,051$ s terdapat *error* sebesar 19,72%. Setelah

ditambahkan motor DC yang dikontrol menggunakan *Neuro-Fuzzy* Prediktif *error* yang terjadi direduksi menjadi $\pm 1\%$.

Pada kontroler yang bersifat prediktif, kemampuan mencapai model referensi ditentukan oleh *time sampling* dan jumlah *prediction horizon*. Pada Tugas Akhir ini digunakan prediksi satu langkah ke depan dengan *time sampling* sebesar 0,05 s sehingga respon mulai mencapai model referensi pada $t = 0,051$ s.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Satrio Aji W., Galih, "Desain dan Implementasi Kontroler Optimal Berbasis Neuro Fuzzy untuk Pengendalian Simulator Hybrid Electric Vehicle", *Tugas Akhir*, 2010, Jurusan Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya
- [2] Sriwidodo, Wahyu, "Perancangan dan Implementasi Pengendalian Traksi Berbasis Neuro Fuzzy Untuk Simulator Kendaraan Hybrid Pada Mode Akselerasi", *Tugas Akhir*, 2010, Jurusan Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya
- [3] Heywood, John B., *Internal Combustion Engine Fundamentals*, McGraw-Hill, Inc., 1998, New York
- [4] Austin Hughes and Bill Drury, *Electric Motors And Drives, Fundamentals, Types, And Applications Fourth Edition*, Elsevier, 2013, Oxford
- [5] Ing. Jakoubek, Pavel, "Experimental Identification of Stable Nonoscillatory Systems from Step-Responses by Selected Methods", *Konference studentské tvůrčí činnosti*, 2009
- [6] Kusumadewi, Sri, "Neuro-Fuzzy Edisi 2", Graha Ilmu, 2010, Yogyakarta